北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

杉木木材微观结构与抗弯性能的构效关系

贾昌东 贺嘉琪 王玉荣

Structure-property relationship between microstructure and bending properties of Chinese fir wood

Jia Changdong, He Jiaqi, Wang Yurong

引用本文:
贾昌东, 贺嘉琪, 王玉荣. 杉木木材微观结构与抗弯性能的构效关系[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(7):166–175. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250497
Jia Changdong, He Jiaqi, Wang Yurong. Structure–property relationship between microstructure and bending properties of Chinese fir wood[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(7):166–175. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250497

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250497

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

木材微观结构分析方法与特征参数
Analysis methods and characteristic parameters of wood microstructure
北京林业大学学报, 2025, 47(3): 7–18. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240287

基于纤维素骨架的毛竹热处理材力学性能研究
Research on mechanical properties of *Phyllostachys edulis* heat treatment materials based on cellulose skeleton
北京林业大学学报, 2023, 45(7): 130–138. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230079

基于遗传效应和气候变量的日本落叶松微纤丝角预测
Microfibril angle prediction of *Larix kaempferi* based on genetic effects and climate variables
北京林业大学学报, 2024, 46(7): 44–54. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230063

轻木细胞壁超微结构与力学性能关系研究
Relationship between cell wall ultrastructure and mechanical properties of balsa wood
北京林业大学学报, 2022, 44(2): 115–122. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210410

柠檬酸预处理杉木压缩变形固定及性能
Compression deformation fixation and properties of Chinese fir pretreated with citric acid
北京林业大学学报, 2022, 44(4): 157–164. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210467

高能微波处理辐射松木材的抗弯力学性能与损伤演化特征
Bending properties and damage evolution characteristics of high–intensity microwave treated radiata pine lumber
北京林业大学学报, 2022, 44(8): 107–116. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220095

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250497

杉木木材微观结构与抗弯性能的构效关系

贾昌东[1,2] 贺嘉琪[1] 王玉荣[1]
（1. 中国林业科学研究院木材工业研究所，北京 100091；2. 南京林业大学，江苏 南京 210037）

摘要:【目的】杉木是我国重要的速生结构用材树种，抗弯性能是其结构安全评价的核心指标。而抗弯性能本质上由木材微观结构决定。阐明杉木木材微观结构与抗弯性能的构效关系，可以为杉木木材抗弯性能快速评估、加工改良以及杉木遗传改良措施实施提供科学依据。**【方法】**以江西省宜春市年珠林场 30 年以上人工林杉木为对象，沿径向区分心材与边材，利用光学显微镜、X 射线衍射仪、应力波检测仪及万能力学试验机等，系统获取壁腔比、微纤丝角、结晶度等微观结构因子及动态/静态抗弯性能指标。通过普通线性和多元线性回归分析，分别构建应力波波速、微观结构因子与抗弯性能的关系模型。**【结果】**杉木边材呈现“高壁腔比（较心材高 27.0%）、高结晶度（较心材高 14.6%）、低微纤丝角（较心材低 21.7%）”的特征，其动态弹性模量、抗弯弹性模量和抗弯强度较心材分别提升 5.9%、7.1% 和 12.4%。应力波波速与抗弯性能显著相关（R^2 为 0.66 ~ 0.69），壁腔比与抗弯性能的拟合度最高（R^2 = 0.67）。多元线性回归模型的 R^2 为 0.67 ~ 0.71，表明壁腔比、微纤丝角与结晶度共同作用于抗弯性能，其中壁腔比相对贡献最高（标准化系数 β 为 0.49 ~ 0.59），结晶度（β 为 0.19 ~ 0.28）与微纤丝角（β 为−0.18 ~ −0.14）次之。**【结论】**杉木木材抗弯性能由微观结构因子共同决定，高壁腔比、低微纤丝角和高结晶度有利于获得优异抗弯性能；应力波波速与抗弯性能具较好的相关关系，可作为抗弯性能快速评估的重要指标；多元线性回归模型量化了微观结构因子对抗弯性能的共同影响作用和相对贡献，其中壁腔比是影响抗弯性能的主导因子。

关键词：杉木；木材力学；微观结构；抗弯性能；壁腔比；微纤丝角；结晶度；多元线性回归分析
中图分类号：S781.1 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2026)07−0166−10
引文格式：贾昌东，贺嘉琪，王玉荣. 杉木木材微观结构与抗弯性能的构效关系［J］. 北京林业大学学报，2026，48(7)：166−175. Jia Changdong, He Jiaqi, Wang Yurong. Structure-property relationship between microstructure and bending properties of Chinese fir wood［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(7): 166−175.

Structure-property relationship between microstructure and bending properties of Chinese fir wood

Jia Changdong[1,2] He Jiaqi[1] Wang Yurong[1]
(1. Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;
2. Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China)

Abstract: ［**Objective**］Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) is one of the most important fast-growing structural timber species in China. Its bending properties are key indicators for evaluating the structural safety of wood materials and are fundamentally determined by the wood microstructure. Clarifying the structure–property relationships between microstructural characteristics and bending properties can provide a scientific basis for rapid assessment, processing modification, and genetic improvement of Chinese fir wood. ［**Method**］Chinese fir trees aged over 30 years from a plantation in Nianzhu Forest Farm, Yichun, Jiangxi Province, China, were selected as the study material. Heartwood and sapwood were distinguished along the

收稿日期: 2025−12−10 **修回日期:** 2026−05−28
基金项目: 国家重点研发计划课题（2023YFD2200501）。
第一作者: 贾昌东。主要研究方向：木材材质无损检测、结构与力学性能的构效关系。Email: xbrrdjcd@163.com 地址：100091 北京市海淀区香山路东小府 1 号中国林业科学研究院木材工业研究所。
责任作者: 王玉荣，研究员。主要研究方向：木材力学与利用。Email: yurwang@caf.ac.cn 地址：100091 北京市海淀区香山路东小府 1 号中国林业科学研究院木材工业研究所。
本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn; https://journal.bjfu.edu.cn

radial direction. Microstructural parameters, including wall-to-lumen ratio, microfibril angle, and crystallinity, together with dynamic and static bending properties, were determined using optical microscopy, X-ray diffraction, stress-wave testing, and a universal testing machine et al. Ordinary linear regression and multiple linear regression analyses were performed to establish predictive relationships between stress-wave velocity, microstructural factors, and bending properties. [**Result**] Compared with heartwood, sapwood exhibited a wall-to-lumen ratio 27.0% higher, a crystallinity 14.6% higher, and a microfibril angle 21.7% lower. The dynamic modulus of elasticity (MOE_d), modulus of elasticity (MOE) in bending, and modulus of rupture (MOR) of sapwood were 5.9%, 7.1%, and 12.4% higher than those of heartwood, respectively. Significant relationships were observed between stress-wave velocity and bending properties, with R^2 ranging from 0.66 to 0.69. Among the individual microstructural factors, the wall-to-lumen ratio showed the strongest relationship with bending properties (R^2 = 0.67). The multiple linear regression models yielded R^2 values ranging from 0.67 to 0.71, indicating that wall-to-lumen ratio, microfibril angle, and crystallinity jointly affected bending properties. The standardized regression coefficients showed that the wall-to-lumen ratio had the greatest relative contribution (β of 0.49–0.59), followed by crystallinity (β of 0.19–0.28) and microfibril angle (β ranged from −0.18 to −0.14). [**Conclusion**] The bending properties of Chinese fir wood are governed by its microstructural factors. A higher wall-to-lumen ratio, lower microfibril angle, and higher crystallinity are associated with superior bending performance. Stress-wave velocity showed relatively strong relationships with bending properties and can therefore serve as an effective indicator for rapid evaluation of bending properties. The multiple linear regression models quantitatively characterized the combined effects and relative contributions of microstructural factors, with wall-to-lumen ratio identified as the dominant factor influencing bending properties.

Key words: *Cunninghamia lanceolata*; wood mechanics; microstructure; bending properties; wall-to-lumen ratio; microfibril angle; crystallinity; multiple linear regression analysis

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是我国特有的速生针叶材树种，其人工林面积和蓄积量均居我国首位[1]。因其具有生长迅速、材质优良等特点，常作为结构用材广泛应用于建筑、家具、造船等领域[2]，是支撑我国生产生活和经济建设的重要林木资源[3]。人工林杉木抗弯性能作为衡量其木材抗变形能力和承载能力的关键指标，直接影响其在结构用材中的安全性和稳定性。因此，对人工林杉木抗弯性能进行准确、高效的评估尤为重要。

传统木材抗弯弹性模量(modulus of elasticity，MOE)和抗弯强度(modulus of rupture，MOR)等抗弯性能测试依赖国家标准方法的静态力学试验，存在成本高、效率低等问题。而应力波检测技术因其成本低、快速、无损等特点，在木材抗弯性能快速评估和材质初步筛选中得到广泛应用[4−7]。其通过测定应力波波速获取动态弹性模量(dynamic modulus of elasticity，MOE_d)，并进一步关联静态抗弯性能，目前已在落叶松(*Larix gmelinii*)[8]、美洲黑杨(*Populus deltoides*)[9]等树种材质评估中取得良好应用效果。但其在人工林杉木中应用较少，且应力波波速与抗弯性能之间的相关关系尚不清晰。

木材的力学性能的差异本质上源于其微观结构的不同[10]。管胞作为针叶材的主要组成单元，其显微构造(如壁厚[11]、腔直径[12]、壁腔比等[13])与细胞壁超微结构(如微纤丝角[14]、结晶度[15]等)是决定木材力学性能的关键微观结构因子。其中壁腔比[16]、结晶度[17]与抗弯性能指标呈正相关，而微纤丝角的减小有助于增强木材的强度[18]和刚度[19]，这些微观结构因子共同影响木材力学性能[20]。然而，目前针对人工林杉木微观结构因子与抗弯性能的定量构效关系仍需明确，各微观结构因子的相对贡献、影响程度和共同影响作用还需进一步探究。

鉴于此，本研究以 30 年生以上人工林杉木为研究对象，系统分析其不同径向部位的微观结构和抗弯性能，以揭示微观结构因子与抗弯性能指标的对应关系；进一步构建应力波波速、微观结构因子与抗弯性能指标的线性回归模型，以快速评估抗弯性能并量化微观结构因子对抗弯性能的共同影响和相对贡献。本研究旨在阐明杉木木材微观结构与抗弯性能的构效关系，以期为杉木木材的抗弯性能快速评估、加工改良及杉木遗传改良措施实施提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材 料

本研究人工林杉木采自江西省宜春市年珠林场(27°34′N, 114°34′E)。林场地处亚热带季风性湿润气候区，年平均气温 16.8 ℃，年降水量 1 590 mm，林地海拔多在 300～900 m 之间，坡度以 15°～30°为主。共选取 4 株树干通直、生长良好的 30 年以上人工林杉木作为样木。样木胸径范围为 20.0～25.5 cm，平均胸径为 21.6 cm。

1.2 试样制备

每株样木在树高 1.4～2.5 m 区间截取 1 段 1 100 mm 长原木段，根据 GB/T 1927.2—2021《无疵小试样木材物理力学性质试验方法第 2 部分：取样方法和一般要求》，按图 1a 的取样方法，将原木锯为南北向、东西向以及扇形中心板，气干后再于心材(年轮：4～16、4～22)和边材(年轮：17～29、23～35)获取 49 根规格为 20 mm(径向)×20 mm(弦向)×480 mm(纵向)的无疵小试样。按图 1b 所示，从无疵小试样上沿纵向依次截取微观结构因子与抗弯性能指标试样，分别为 1 个纵向长度 20 mm 的显微构造试样、2 个纵向长度 30 mm 的微纤丝角和结晶度试样、1 个纵向长度 380 mm 的应力波测试试样，应力波测试后锯掉两端木块，保留 300 mm 作为 MOE/MOR 试样。

1.3 微观结构观测

1.3.1 显微构造

如图 1c 所示，最终将显微构造试样锯解成 10 mm(径向)×10 mm(弦向)×15 mm(纵向)的木块。使用滑走切片机从木块横断面上切取 25 μm 厚切片，经番红染色、梯度酒精脱水、二甲苯透明后制成永久切片[21]。将切片置于 ZEISS Imager A1 显微镜下观察拍照，获得每株杉木样木各试样的显微构造图。使用 Image J 软件测量每个试样早、晚材管胞径向双壁厚、径向腔直径，每个试样早晚材各测 30 个管胞，获得各个试样管胞双壁厚和腔直径平均值，并计算其壁腔比。

1.3.2 微纤丝角

将所截取的微纤丝角试样锯解成 30 mm(纵向)×10 mm(弦向)×1.5 mm(径向)的木片试样，每个试样制取 5 片。采用广角 X 射线散射仪(PANalyticalX-pertPRO)测定各木片试样的微纤丝角，衍射角为 22.4°，旋转范围 0°～360°，木片弦切面与 X 射线照射方向垂直。根据获得的 002 面衍射图，采用 0.6T 法计算杉木各试样平均微纤丝角。

1.3.3 结晶度

将结晶度试样粉碎后过 80～100 目筛，取木粉样品用 X 射线衍射仪测定杉木的结晶度。扫描范围 5°～55°，扫描速度 6(°)/ min，管压 40 kV，管流 30 mA。采用 Segal 经验法(式 1)计算结晶度。

$$C_{\mathrm{rI}} = \frac{I_{002} - I_{\mathrm{am}}}{I_{002}} \times 100\% \tag{1}$$

式中：C_{rI} 为试样结晶度(%)，I_{002} 为(002)晶面($2\theta \approx 22.5°$)的最大衍射强度，I_{am} 为无定形区($2\theta \approx 18°$)的衍射强度。

1.4 抗弯性能表征

1.4.1 应力波波速与动态弹性模量

用恒温恒湿箱(恒温 20 ℃、恒湿 65%)将所有

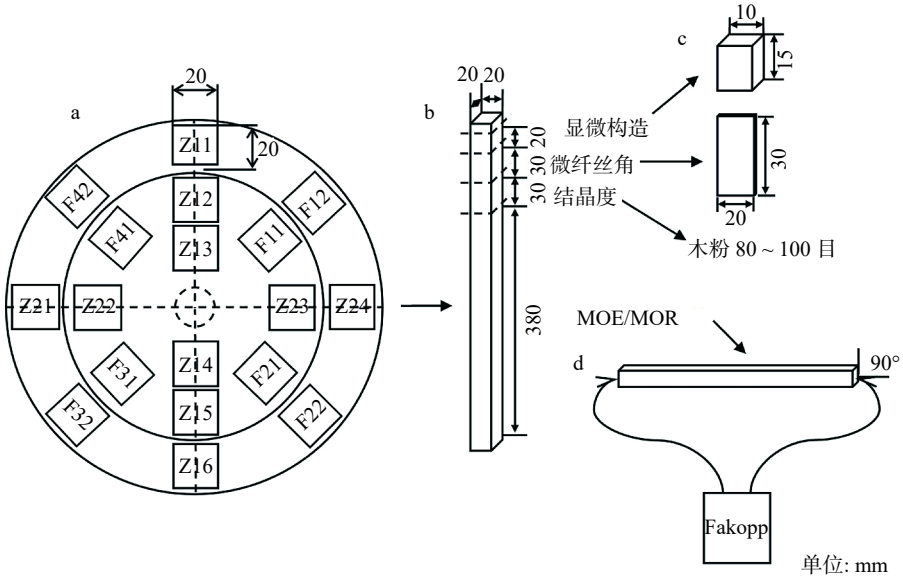


图 a 文字为锯解图编号，Z1 表示南北向中心板，Z2 表示东西向中心板，F 是扇形区域。

图 1 杉木微观结构与抗弯性能试样制备

Fig. 1 Preparation of samples for microstructure and bending property tests of Chinese fir

380 mm 长的应力波测试试样的含水率平衡至约 12% 后，采用 FAKOPP 微秒计（精度为 ± 1 μs）对试样进行应力波波速检测。为减小应力波折损，探头沿顺纹方向以 90°钉入试样两端，用小锤敲击探头激发应力波，重复敲击 5 ~ 10 次，确保每两次传播时间之差 < 3 μs，取平均值，记录传播时间，按式（2）计算应力波波速。

$$V_{\mathrm{L}} = \frac{L}{t} \times 10^{6} \tag{2}$$

式中：V_{L} 为试样应力波波速（m/s），L 为探头间距（m），t 为传播时间（μs）。

测完波速后用称量法获取试样气干密度，按式（3）计算动态弹性模量。

$$E_{\mathrm{d}} = \rho V_{\mathrm{L}}^{2} \times 10^{-6} \tag{3}$$

式中：E_{d} 为试样动态弹性模量（GPa），ρ 为试样气干密度（g/cm^3）。

1.4.2　抗弯弹性模量与抗弯强度

在恒温 20 ℃、恒湿 65% 的环境下将所有 MOE/MOR 试样的含水率平衡至约 12% 后，采用万能力学试验机（Instron 5582），按 GB/T 1927.10—2021《无疵小试样木材物理力学性质试验方法第 10 部分：抗弯弹性模量测定》和 GB/T 1927.9—2021《无疵小试样木材物理力学性质试验方法第 9 部分：抗弯强度测定》依次测定 MOE 与 MOR，荷载加载速度分别为 3 和 5 mm/min。

1.5　线性回归模型的构建

采用 Origin 构建线性回归模型，普通线性回归模型仅含 1 个自变量，多元线性回归模型含 2 个及以上自变量，统一表达式如式 4。

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + \cdots + b_iX_i + \epsilon \tag{4}$$

式中：Y 为因变量，X_i 为第 i 个自变量（$i = 1$ 时为普通线性回归模型，$i \geqslant 2$ 时为多元线性回归模型），b_0 为截距，b_i 为第 i 个自变量回归系数，ϵ 为随机误差。

为比较各微观结构因子对抗弯性能的相对贡献，采用标准化回归系数（β）进行分析，β 绝对值越大，自变量相对贡献越大。β 由自变量回归系数与变量标准差换算得到（式 5）。

$$\beta_i = b_i \times \frac{S_{x_i}}{S_y} \tag{5}$$

式中：β_i 为第 i 个自变量的标准化回归系数，b_i 为第 i 个自变量回归系数，S_{xi} 为第 i 个自变量的标准差，S_y 为因变量的标准差。

2　结果与分析

2.1　杉木木材微观结构

2.1.1　显微构造

观测发现杉木木材横切面年轮界限清晰，心材和边材的早材和晚材管胞形态差异明显，其中早材管胞多呈卵圆形，壁薄腔大，晚材管胞为长方形，壁厚腔小（图 2）。早材管胞[11]主要承担水分运输功能，晚材管胞[12]是木材力学强度的主要承载单元。

杉木管胞平均双壁厚范围在 4.36 ~ 7.35 μm，管胞腔直径范围在 10.10 ~ 26.25 μm，壁腔比范围在 0.17 ~ 0.73（表 1）。对比不同径向部位管胞显微构造，从心材到边材：双壁厚平均值由 5.65 μm 增至 6.17 μm，增幅 9.2%；管胞腔直径由 19.34 μm 降至 17.06 μm，降幅 11.8%；边材平均壁腔比（0.47）高于心材（0.37），增幅达 27.0%。边材的早材和晚材的双壁厚均高于心材，管胞腔直径均低于心材，从而壁腔比均高于心材。从杉木显微构造特征差异可以推测其力学性能差异：边材较心材具有更高的壁腔比，其抗变形能力以及承载能力应更强，有更优异的抗弯性能。

2.1.2　微纤丝角

杉木不同径向部位微纤丝角的 X 射线衍射图谱

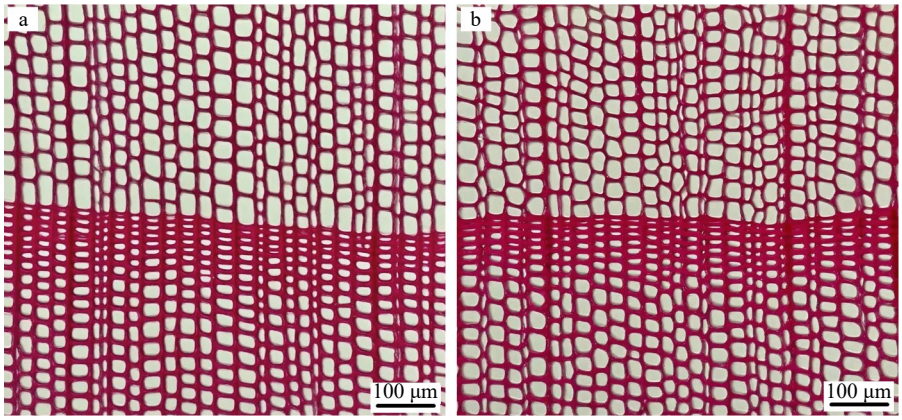


图 2　杉木边材（a）和心材（b）横切面显微构造

Fig. 2　Microstructure of cross-sections of sapwood (a) and heartwood (b) of Chinese fir

表 1 杉木木材管胞解剖构造参数

Tab. 1 Structural parameters of tracheid of Chinese fir wood

部位	晚材					早材				
	双壁厚		腔直径		壁腔比	双壁厚		腔直径		壁腔比
	平均值/μm	标准差/μm	平均值/μm	标准差/μm		平均值/μm	标准差/μm	平均值/μm	标准差/μm	
心材	6.93***	1.34	12.43**	3.84	0.56	4.36*	1.11	26.25**	6.14	0.17
边材	7.35***	0.86	10.10**	1.86	0.73	4.98*	1.19	24.01**	6.57	0.21

注：*表示在$p < 0.05$水平显著，**表示在$p < 0.01$水平显著，***表示在$p < 0.001$水平显著。下同。

(图 3a)显示，心材与边材 002 面衍射峰的方位角分布存在明显差异，反映出其不同径向部位微纤丝排列角度的差异。杉木木材微纤丝角范围为 12.75°～24.39°，微纤丝角平均值为 15.58°。心材微纤丝角较大，边材微纤丝角较小，从心材到边材，微纤丝角由 19.44°降低至 15.22°，降幅 21.7%(表 2)，表明边材纤维素微纤丝排列更趋近于轴向。前人研究表明，具有较小微纤丝角的杉木木材具有较优的抗弯性能[17]，可以推测本研究杉木边材较心材具有较优的抗弯性能。

2.1.3 结晶度

杉木不同径向部位结晶度的 X 射线衍射图谱(图 3b)显示，心材与边材 002 晶面($2\theta \approx 22.5°$)衍射峰强度存在明显差异，边材的衍射峰更高且半高宽更窄。杉木木材结晶度范围为 28.70%～46.32%，平均结晶度为 38.64%。心材结晶度较小，边材结晶度较大(表 3)。从心材到边材，结晶度由 36.31% 增至 41.62%，增幅 14.6%，表明边材纤维素分子链有序度更高。具有较高结晶度的杉木木材具有较优的抗弯性能[17]，因此推测杉木边材较心材具有较优的抗弯性能。

2.2 杉木木材抗弯性能

2.2.1 应力波波速与动态弹性模量

杉木不同径向部位波速和 MOE_d 存在明显差异，边材波速和 MOE_d 均较心材的大(表 4)。边材波速(4 831 m/s)较心材(4 721 m/s)高 2.3%。边材密度(0.426 g/cm^3)较心材(0.390 g/cm^3)高 10.0%。边材 MOE_d(9.93 GPa)较心材(9.38 GPa)高 5.9%。整体来看，波速和密度较大的边材的 MOE_d 高于波速和密度较小的心材。

2.2.2 抗弯弹性模量与抗弯强度

与 MOE_d 一样，杉木不同径向部位的 MOE 和 MOR 也存在明显差异。边材 MOE(10.05 GPa)较心材(9.38 GPa)高 7.1%(表 5)。边材 MOR(73.21 MPa)较心材(65.14 MPa)高 12.4%。对比 MOE 与 MOE_d 的平均值发现，MOE(9.72 GPa)与 MOE_d(9.66 GPa)平均数值接近，相对误差仅 1.1%。结合波速与 MOE_d 的关系，可以推断出 MOE 越大波速越大，表明波速可用于 MOE 的快速评估。

杉木木材抗弯性能关联其微观结构因子发现，

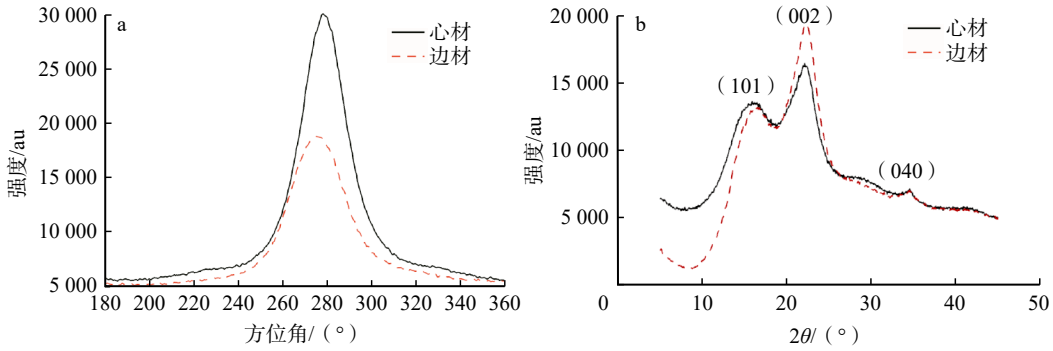


图 3 杉木木材微纤丝角(a)和结晶度(b)的 X 射线衍射图谱

Fig. 3 X-ray diffraction patterns of microfibril angle (a) and crystallinity (b) in Chinese fir wood

表 2 杉木木材微纤丝角统计

Tab. 2 Statistics of microfibril angle of Chinese fir wood

部位	平均值/(°)	标准差/(°)	变异系数/%
心材	19.44***	4.93	25.39
边材	15.22***	3.51	23.04

表 3 杉木木材结晶度统计

Tab. 3 Statistics of the crystallinity of Chinese fir wood

部位	平均值/%	标准差/%	变异系数/%
心材	36.31**	4.86	13.38
边材	41.62**	2.74	6.58

表 4　杉木木材应力波波速及动态弹性模量统计

Tab. 4　Statistics between stress wave velocity and dynamic modulus of elastic of Chinese fir wood

部位	波速			MOE_d		
	平均值/(m·s^{-1})	标准差/(m·s^{-1})	变异系数/%	平均值/GPa	标准差/GPa	变异系数/%
心材	4 721*	83.44	1.7	9.38*	1.70	18.09
边材	4 831*	99.52	2.1	9.93*	1.26	12.80

表 5　杉木木材抗弯弹性模量与抗弯强度统计

Tab. 5　Statistics of modulus of elastic and modulus of rupture of Chinese fir wood

部位	MOE			MOR		
	平均值/GPa	标准差/GPa	变异系数/%	平均值/MPa	标准差/MPa	变异系数/%
心材	9.38*	1.89	20.11	65.14*	15.75	24.18
边材	10.05*	1.56	15.48	73.21*	13.63	18.61

管胞壁腔比越高，细胞壁实质物质越多，MOR 越高(如壁腔比 0.38 的试样的 MOR 可达 89.82 MPa，是壁腔比 0.17 试样的 1.5 倍)；微纤丝角越小，微纤丝传递应力的效率越高，MOE 越高(如微纤丝角 12.75°的试样的 MOE 达 12.20 GPa，较微纤丝角 24.39°的试样高 82.91%)；结晶度越高，细胞壁刚度越高，MOE 与 MOR 均越高(如结晶度 46% 试样的 MOE 与 MOR 分别较结晶度 29% 的试样高 42% 和 38%)。

2.3　应力波波速与抗弯性能的关系模型

由表 6 可知，杉木应力波波速与抗弯性能指标均呈显著正相关($p < 0.05$)，与 MOE_d、MOE 和 MOR 的相关系数(r)均≥0.81，表现出强相关性。决定系数(R^2)在 0.66 ~ 0.69 之间，表明波速在模型中可解释 66% ~ 69% 的抗弯性能变异。模型 R^2 结果表明，波速与抗弯性能指标具有高拟合度，其中波速与 MOE_d 拟合度最高($R^2 = 0.69$)，表明应力波波速可以用于抗弯性能的快速评估。

2.4　微观结构与抗弯性能的构效关系模型

由表 7 可知，杉木管胞壁腔比与 MOE_d、MOE 和 MOR 均呈显著正相关($p < 0.05$)，r 均≥0.82，表现出较强相关性。R^2 均在 0.66 以上，表明壁腔比在模型中至少解释了 66% 的抗弯性能变异，且其对 3 个抗弯性能指标的影响程度较为一致。杉木微纤丝

表 6　杉木木材应力波波速与抗弯性能的关系模型

Tab. 6　Relationship model of stress wave velocity and bending properties of Chinese fir wood

无损检测指标(x)	抗弯性能指标(y)	回归方程	r	R^2	显著性
波速	MOE_d	$y = -55.80 + 0.01x$	0.83	0.69	*
	MOE	$y = -64.92 + 0.02x$	0.81	0.66	*
	MOR	$y = -578.65 + 0.13x$	0.81	0.66	*

表 7　杉木木材微观结构与抗弯性能的构效关系模型

Tab. 7　Model of structure-property relationship between microstructure and bending performance of Chinese fir wood

微观结构因子(x)	抗弯性能指标(y)	回归方程	r	R^2	显著性
壁腔比	MOE_d	$y = 4.05 + 21.12x$	0.82	0.67	*
	MOE	$y = 3.25 + 24.57x$	0.82	0.66	*
	MOR	$y = 12.95 + 213.82x$	0.82	0.67	*
微纤丝角	MOE_d	$y = 15.33 - 0.36x$	−0.72	0.52	*
	MOE	$y = 16.88 - 0.45x$	−0.76	0.54	*
	MOR	$y = 121.58 - 3.29x$	−0.71	0.50	*
结晶度	MOE_d	$y = 0.93 + 22.67x$	0.74	0.55	*
	MOE	$y = -0.04 + 25.86x$	0.75	0.57	*
	MOR	$y = -4.37 + 19.23x$	0.73	0.53	*

角与 MOE_d、MOE 和 MOR 均呈显著负相关($p < 0.05$)，r 在−0.76～−0.71 之间，表现出中强负相关性。R^2 均在 0.50 以上，说明微纤丝角在模型中至少解释了 50% 的抗弯性能变异。微纤丝角对抗弯性能指标中的 MOE 影响程度相对较大，对 MOR 影响程度相对较小，对 MOE_d 影响程度居中。杉木结晶度与 MOE_d、MOE 和 MOR 均呈显著正相关($p < 0.05$)，r 在 0.73～0.75 之间，表现出中强相关性。R^2 均在 0.53 以上，说明结晶度在模型中至少解释了 53% 的抗弯性能变异。结晶度和微纤丝角一样，其对抗弯性能指标中 MOE 影响程度相对较大，MOR 影响程度相对较小，对 MOE_d 影响程度居中。

由以上普通线性回归模型的 r 和 R^2 结果可知，壁腔比、微纤丝角和结晶度都是影响杉木抗弯性能的主要微观结构因子，但各因子对抗弯性能影响程度不同。其中，壁腔比影响程度最大，结晶度次之，微纤丝角最小。需要指出的是，各微观结构因子之间可能存在共线性，普通线性回归模型的 R^2 仅反映单一变量在未控制其他微观结构因子影响的条件下的解释能力，因此 R^2 不具有可加性。而多元线性回归模型在同时纳入多个微观结构因子后，能够更合理地评价微观结构因子对抗弯性能的共同影响作用。

如表 8 所示，3 个多元线性回归模型 R^2 均≥0.67，说明 3 个微观结构因子至少解释了 67% 的抗弯性能变异，其中对 MOE 的解释力较突出(R^2 = 0.71)。对比本研究构建的普通线性回归模型与多元线性回归模型，发现多元线性回归模型的 R^2 更高，表明 3 个微观结构因子与抗弯性能指标的拟合度更优，体现了 3 个微观结构因子对抗弯性能的共同影响作用。

3 个模型中壁腔比的标准化系数均最高(β = 0.49～0.59)，其次是结晶度(β = 0.19～0.28)和微纤丝角(β = −0.18～−0.14)。虽然引入微纤丝角和结晶度后模型解释力并未大幅提升，但标准化回归系数表明它们仍有明显的独立贡献。标准化系数明确了不同微观结构因子在同一模型中的相对贡献，证实了壁腔比是主导杉木抗弯性能的最关键微观因子。

3 讨 论

3.1 杉木微观结构径向变异及其与抗弯性能的相关关系

木材力学性能的径向变异本质上源于细胞显微构造与细胞壁超微结构的径向梯度变化。本研究观测到的杉木径向不同部位管胞的壁腔比、微纤丝角和结晶度 3 个微观结构因子与 MOE_d、MOE 和 MOR 的相关关系明显。

3.1.1 壁腔比与抗弯性能

木材管胞壁腔比是衡量管胞抗变形能力的核心指标，壁腔比越高，说明其细胞壁物质占比越大，归结到其宏观性能上，其抵抗弯曲载荷下形变的能力越强[22]。本研究观测到杉木管胞形态沿径向呈现由内向外“壁厚腔小”变化趋势，边材早晚材壁腔比均高于心材，整体壁腔比增幅达 27.0%，其抗弯性能增幅在 5.9%～12.4% 之间。这与杨丽等[23]在针叶材中报道的管胞壁腔比增大导致力学性能增强的结论一致。

3.1.2 微纤丝角与抗弯性能

细胞壁微纤丝角的减小是木材力学性能提高的另一关键因素。树木处于幼龄期时，为适应快速生长，细胞壁 S_2 层微纤丝需保持较大角度以增强细胞轴向柔韧性，微纤丝角相对较大[24]。但随树龄增长，树木生长速率减缓，细胞壁的合成更注重刚性提升，微纤丝排列越来越接近细胞轴向，微纤丝角随之逐渐减小[25−27]。较小的微纤丝角可使纤维素分子链更高效地传递外力，减少外力作用下的细胞壁滑移变形[25]。因此，微纤丝角随树龄增加而减小的规律，是杉木边材力学性能优于心材的原因之一。本研究杉木边材微纤丝角较心材降低 21.7%，抗弯性能较心材的有明显提高，这与 Donaldson[28]在针叶材中报道的微纤丝角减小增强木材刚度的结论相同。

3.1.3 结晶度与抗弯性能

结晶度从细胞壁纤维素有序性角度进一步影响细胞壁刚性。从化学角度分析，随树龄增长，木材细胞壁纤维素分子链的聚集态结构有序化提高，无定形区比例减少，结晶区比例增加[29−30]，表现为边材

表 8 杉木木材抗弯性能指标多元线性回归模型

Tab. 8 Multiple linear regression model of bending properties index of Chinese fir wood

抗弯性能指标	回归方程	R^2	β_W	β_M	β_C	显著性
MOE_d	$MOE_d = 4.00 + 18.84W - 0.06M + 4.25C_{rl}$	0.67	0.56	−0.14	0.21	***
MOE	$MOE = 2.14 + 18.44W - 0.08M + 10.49C_{rl}$	0.71	0.49	−0.18	0.28	***
MOR	$MOR = 12.96 + 15.30W - 0.56M + 35.69C_{rl}$	0.67	0.59	−0.16	0.19	***

注：W表示壁腔比，M表示微纤丝角，C_{rl}表示结晶度，β_W表示壁腔比的标准化回归系数，β_M表示微纤丝角的标准化回归系数，β_C表示结晶度的标准化回归系数。

结晶度高于心材。较高的结晶度意味着纤维素分子间氢键结合更紧密，在抗弯性能测定的弹性阶段，结晶度主要通过提高细胞壁刚性影响提高 MOE，而在破坏阶段则通过增强细胞壁结构稳定性提高 MOR[20−21]。从本研究杉木径向各部位结晶度的差异来看，边材结晶度较心材提高 14.6%，有更优的抗弯性能。这与 Li 等[25]、Lachowicz 等[30]在辐射松(*Pinus radiata*)和银桦木(*Betula pendula*)研究中高结晶度木材具有高力学性能的结论一致。

3.1.4　微观结构因子对抗弯性能的共同影响作用

进一步分析 3 个微观结构因子对抗弯性能的共同影响作用，发现具有较高壁腔比、较小微纤丝角和较高结晶度的杉木木材，其抗弯性能较高。这是因为壁腔比决定细胞壁物质含量，微纤丝角影响应力传递方向，结晶度增强细胞壁刚性，三者共同作用于弯曲承载过程。说明可通过“壁腔比提高 + 微纤丝角降低 + 结晶度提高”的多维优化，实现杉木木材 MOE_d、MOE 和 MOR 的提高，这体现了微观结构因子对抗弯性能的共同影响作用。这些构效关系的揭示，可指导木材从微观尺度改良性能以及遗传层面实现对关键微观结构因子的定向调控，为杉木木材抗弯性能快速评估、加工改良及遗传改良措施实施提供科学依据。

3.2　应力波技术在杉木材质评估中的应用潜力

除了力学试验机实测外，应力波检测技术为实现杉木抗弯性能的快速评估提供了方法。本研究检测了杉木木材不同径向部位的应力波波速和密度，其中边材波速(4 831 m/s)和密度(0.426 g/cm^3)均高于心材，MOE_d 提高了 5.9%。MOE 与 MOE_d 的数值接近(相对误差 1.1%)，验证了应力波技术的可靠性，与 van Duong 等[7]在桉树(*Eucalyptus*)中的应用相似。本研究中波速与 MOE_d、MOE 和 MOR 均呈较强正相关，R^2 在 0.66 ~ 0.69 之间，可解释 66% ~ 69% 的抗弯性能变异，这与 Wang 等[5]在桉树中的结果接近。

本研究发现抗弯性能较大的杉木，其应力波波速较大。进一步分析其微观结构因子，发现壁腔比较高、微纤丝角较低和结晶度较高的木材波速较高。这种“高壁腔比、低微纤丝角和高结晶度”的微观结构特征，提高了细胞壁物质含量和结构连续性，并使纤维素微纤丝排列更接近细胞轴向(即应力波传播方向)，减少了应力波在传播过程中的散射与能量耗散，还增大了细胞壁刚度，这不仅直接增强了木材的力学性能，还提升了应力波在木材中的传播效率[31]。尽管 MOE_d 的计算仅依赖于密度和应力波波速，但这些物理参数本身受木材微观结构特征的影响，因此微观结构因子影响波速和密度间接影响 MOE_d。这反映波速可作为评价杉木微观结构和抗弯性能优劣的依据，为利用应力波技术进行杉木材质评估提供了科学依据。

3.3　杉木木材微观结构因子与抗弯性能的关系模型

木材宏观力学性能本质上由多层级结构因子共同决定，其中壁腔比、微纤丝角和结晶度共同决定了细胞壁的轴向刚度与整体承载能力。本研究在分析微观结构因子与抗弯性能大小对应关系的基础上构建了普通线性与多元线性回归模型，进一步量化了微观结构因子对抗弯性能的相对贡献和共同影响作用。

3.3.1　单一微观结构因子与抗弯性能

本研究普通线性回归分析显示，壁腔比与抗弯性能均呈较强正相关(r = 0.82)，与 de Borst 等[19]在硬木中观察到的细胞壁厚度对刚度的正向影响结果一致；微纤丝角与 MOE 呈较强负相关(r = −0.76)，这一结果与 Donaldson[28]、Lachenbruch 等[31]、Cave 和 Walker[32]的理论相符，即微纤丝角每降低 5°，MOE 可提升 15% ~ 25%；结晶度与 MOE、MOR 均呈较强正相关(r = 0.75 和 r = 0.73)，与 Wang 等[26]、Jahan 等[29]在针叶材中的结果一致。与贾茹等[17]在杉木无性系中的相关性分析相比，本研究进一步扩展到微观结构因子与抗弯性能的定量关系。

3.3.2　多个微观结构因子与抗弯性能

本研究单一微观结构因子虽可在一定程度上解释抗弯性能差异，但对于多个微观结构因子对抗弯性能的共同影响作用其解释力有限。Lachenbruch 等[31]的研究表明，当仅以单一微观结构因子建立回归模型时，MOE 的预测精度受限，普通线性回归模型的 R^2 通常难以超过 0.60，而将多个微观结构因子联合建模后，模型解释力会明显提高，模型的 R^2 可提升至 0.70 以上。本研究基于多微观结构因子和 MOE_d、MOE 和 MOR 的多元线性回归模型 R^2 分别为 0.67、0.71 和 0.67，较普通线性回归模型整体有所提高(R^2 = 0.50 ~ 0.67)。进一步量化各微观结构因子的相对贡献，壁腔比的标准化系数最高(β = 0.49 ~ 0.59)，相对贡献度最大，这与普通线性回归模型中较高的决定系数(R^2 = 0.67)相互印证，确证了其主导地位。结晶度与微纤丝角虽相对贡献度次之，但其标准化系数分别为正向 0.19 ~ 0.28 和负向−0.18 ~ −0.14，表明二者是不可或缺的微观结构因子，与 Wang 等[26]在木材细胞壁中的多微观结构因子对抗弯性能的共同影响作用结果一致。

3.4　研究展望

本研究采用应力波技术快速获取了抗弯性能指标，并系统揭示了杉木微观结构因子与抗弯性能的

构效关系，构建的多元线性回归模型量化了微观结构因子对抗弯性能的共同影响作用和相对贡献，为具有相似生长特性的杉木木材的性能评估、加工改良及杉木遗传改良提供了依据。但在应用应力波技术进行木材材质评估时，应充分考虑含水率、温度及内部缺陷等因素对应力波传播速度的影响。其中含水率和温度变化会改变木材介质的弹性与密实状态，内部缺陷会扰乱应力波的传播路径并引起散射与能量耗散，从而使测得的应力波波速偏离真实材性水平，在未来研究中可通过建立校正模型对波速加以修正。为提升材质评估的准确性与可靠性，未来可进一步探索将应力波技术与近红外光谱、超声波、电阻仪等其他无损检测手段联用，构建多源信息互补的杉木材质综合评价系统。在构效关系建模方面，由于不同种源、立地条件、林分密度和树龄等对杉木木材微观结构与力学性能都可能产生影响，且木材的微观结构因子和性能指标较多，目前研究的微观结构因子和力学性能指标有限。建议今后研究进一步拓展不同产区、不同生长条件下的杉木样本，可引入木射线比例、细胞壁化学组分（如木质素、纤维素）等更多微观结构因子以及更多的性能指标，并可采用机器学习等非线性建模方法，构建更精准、广谱的杉木微观结构与其性能构效关系模型。应力波技术可结合微观结构优选指标，推动其在杉木良种选育、遗传改良和木材材质快速评估中的应用，在实现杉木资源的高效利用的同时，为全国杉木的遗传育种及高效利用提供更全面的科学依据。

4 结　　论

本研究在同一试样体系下系统研究了杉木木材微观结构与抗弯性能的构效关系。其中构建的应力波波速与抗弯性能指标关系模型可以用于抗弯性能的快速评估；构建的微观结构因子与抗弯性能的关系模型阐明了微观结构因子对抗弯性能的影响程度、相对贡献和共同影响作用。主要结论有以下 3 点。

（1）杉木径向不同部位微观结构因子与抗弯性能指标有明显对应关系。杉木边材管胞较心材呈现明显的“壁厚腔小”的特征；边材壁腔比和结晶度分别较心材高 27.0% 和 14.6%，边材微纤丝角较心材低 21.7%；边材 MOE_d、MOR 和 MOE 分别较心材高 5.9%、12.4% 和 7.1%，边材微观结构、抗弯性能均较心材更优；杉木木材抗弯性能的差异本质由其微观结构决定，具有较大壁腔比、较低微纤丝角和较高结晶度的木材，其具备较高的承载能力和抗变形能力。

（2）应力波波速可以作为抗弯性能指标快速评估的重要指标。杉木抗弯性能越优，其应力波波速越大，且应力波波速与抗弯性能拟合度较优，可解释约 66% 的抗弯性能变异。具有较高壁腔比、较小微纤丝角和较高结晶度的杉木木材，其应力波波速较大。在实际应用中，可通过应力波波速大小实现对杉木木材材质优劣的快速评估。

（3）各微观结构因子共同影响抗弯性能但其影响程度和相对贡献存在差异。构建的多元线性回归模型 R^2 高于普通线性回归模型，证实 3 个微观结构因子对抗弯性能的共同影响作用。3 个微观结构因子中，壁腔比是主导因子，其 R^2 和 β 均最高，可解释约 67% 的抗弯性能变异，且影响程度和相对贡献最高，结晶度与微纤丝角次之。

参 考 文 献

［1］ 国家林业和草原局中国森林资源报告 (2014—2018)[M] 北京: 中国林业出版社, 2019.
National forestry and grassland administration of China, China Forest Resources Report (2014−2018) [M] Beijing: China Forestry Press, 2019.

［2］ 颜耀, 李秉钧, 何宗明, 等. 不同种源杉木木材特性的比较研究 [J]. 林业科学研究, 2021, 34(5): 49−57.
Yan Y, Li B J, He Z M, et al. Comparative study on wood characteristics of *Cunninghamia lanceolata* from different provenances [J]. Forest Research, 2021, 34(5): 49−57.

［3］ 吴义强. 木材科学与技术研究新进展 [J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(1): 1−28.
Wu Y Q. Newly advances in wood science and technology [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2021, 41(1): 1−28.

［4］ 张婉婷, 王立海. 基于应力波的活立木力学特性无损检测研究进展 [J]. 森林工程, 2014, 30(2): 48−51,55.
Zhang W T, Wang L H. The Research progress on non-destructive testing of mechanical properties of standing trees based on stress wave method [J]. Forest Engineering, 2014, 30(2): 48−51,55.

［5］ Wang X, Ross R J, McClellan M, et al. Nondestructive evaluation of standing trees with a stress wave method[J]. Wood and Fiber Science, 2001: 522−533.

［6］ 常丽红, 钱威, 常浩, 等. 应力波对木构件内部空洞的检测 [J]. 木材科学与技术, 2022, 36(4): 70−76.
Chang L H, Qian W, Chang H, et al. Detection of internal voids in wooden components by stress waves [J]. Chinese Journal of Wood Science and Technology, 2022, 36(4): 70−76.

［7］ Van Duong D, Schimleck L. Prediction of static bending properties of *Eucalyptus* clones using stress wave measurements on standing trees, logs and small clear specimens [J]. Forests, 2022, 13(10): 1728.

［8］ 刘丰禄, 姜芳, 王喜平, 等. 应力波在落叶松活立木中的传播规律 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2017, 41(3): 133−139.
Liu F L, Jiang F, Wang X P, et al. Stress wave propagation patterns in larch standing trees [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2017, 41(3): 133−139.

［9］ Madhoushi M, Daneshvar S. Predicting the static modulus of

elasticity in eastern cottonwood (*Populus deltoides*) using stress wave non-destructive testing in standing trees [J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2016, 74(6): 885−892.

[10] 漆楚生, 詹志斌, 戴璐. 木材微观结构分析方法与特征参数 [J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(3): 7−18.
Qi C S, Zhan Z B, Dai L. Analysis methods and characteristic parameters of wood microstructure [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(3): 7−18.

[11] Watanabe U, Norimoto M, Morooka T. Cell wall thickness and tangential Young's modulus in coniferous early wood [J]. Journal of Wood Science, 2000, 46(2): 109−114.

[12] 沈华杰, 邱坚, 杨玉山, 等. 6 种木材的解剖特征与物理力学性能分析 [J]. 西南林业大学学报 (自然科学), 2020, 40(2): 149−154.
Shen H J, Qiu J, Yang Y S, et al. Analysis of anatomical character and physical-mechanical performance of 6 wood species [J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2020, 40(2): 149−154.

[13] 徐慧兰, 胡拉, 林家纯, 等. 马尾松木材管胞特征与物理力学性质的相关分析 [J]. 森林与环境学报, 2017, 37(4): 507−511.
Xu H L, Hu L, Lin J C, et al. Correlation analysis of tracheid characteristics and physical mechanics properties of *Pinus massoniana* timber [J]. Journal of Forest and Environment, 2017, 37(4): 507−511.

[14] 黄艳辉. 杉木木材微纤丝角及其与力学性质关系研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007.
Huang Y H. Study on wood microfibril angle and its relation with wood mechanical properties[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2007.

[15] 孙海燕, 苏明垒, 吕建雄, 等. 细胞壁微纤丝角和结晶区对木材物理力学性能影响研究进展 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2019, 47(5): 50−58.
Sun H Y, Su M L, Lü J X, et al. Research progress on effect of microfibril angle and crystalline area in cell wall on wood physical and mechanical properties [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2019, 47(5): 50−58.

[16] 张勰, 彭俊懿, 石江涛, 等. 湖南铁心杉解剖特征及其物理力学性质研究 [J]. 西南林业大学学报, 2021, 41(1): 155−160.
Zhang X, Peng J Y, Shi J T, et al. Wood anatomical characteristics and physical-mechanical properties of dark-brown heart *Cunningham lanceolate* from Hunan [J]. Journal of Southwest Forestry University, 2021, 41(1): 155−160.

[17] 贾茹, 孙海燕, 王玉荣, 等. 杉木无性系新品种'洋 020'和'洋 061' 10 年生幼龄材微观结构与力学性能的相关性 [J]. 林业科学, 2021, 57(5): 165−175.
Jia R, Sun H Y, Wang Y R, et al. Relativity of microstructures and mechanical properties of juvenile woods of 10-year-old new Chinese fir clones 'Yang 020' and 'Yang 061' [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2021, 57(5): 165−175.

[18] 孙海燕, 苏明垒, 王玉荣. 木材细胞壁力学性能与细胞壁组分和构造的相关性研究 [J]. 林产工业, 2018, 45(10): 22−27.
Sun H Y, Su M L, Wang Y R. Study on the relationship between the mechanical properties and the components, structures of wood cell walls [J]. China Forest Products Industry, 2018, 45(10): 22−27.

[19] de Borst K, Bader T K, Wikete C. Microstructure–stiffness relationships of ten European and tropical hardwood species [J]. Journal of Structural Biology, 2012, 177(2): 532−542.

[20] 赵婉婉. 杉木管胞细胞壁精细结构及其微观力学的研究 [D]. 南京: 京林业大学, 2022.
Zhao W W. Accurate structure and micromechanics of Chinese fir cell wall[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2022.

[21] Scholz A, Klepsch M, Karimi Z, et al. How to quantify conduits in wood? [J]. Frontiers in Pant Science, 2013, 4: 56.

[22] Wang Y, Jia R, Sun H, et al. Wood mechanical properties and their correlation with microstructure in Chinese fir clones [J]. IAWA Journal, 2021, 42(4): 497−506.

[23] 杨丽, 罗杰, 罗建勋, 等. 四川德昌地区杉木管胞特征及物理力学性质研究 [J]. 四川农业大学学报, 2020, 38(4): 457−462.
Yang L, Luo J, Luo J X, et al. Tracheid morphology characteristics and physico-mechanical properties of *Cunninghamia lanceolata* grown in Dechang, Sichuan [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2020, 38(4): 457−462.

[24] Yang J L, Evans R. Prediction of MOE of eucalypt wood from microfibril angle and density [J]. Holz Als Roh- und Werkstoff, 2003, 61(6): 449−452.

[25] Li M Y, Ren H Q, Wang Y R, et al. Comparative studies on the mechanical properties and microstructures of outerwood and corewood in *Pinus radiata* D. Don [J]. Journal of Wood Science, 2021, 67(1): 60.

[26] Wang X, Zhao W, Zhang Y, et al. Exploring wood micromechanical structure: Impact of microfibril angle and crystallinity on cell wall strength [J]. Journal of Building Engineering, 2024, 90: 109452.

[27] Xue B, Hu Y. Analysis of the microstructure and mechanical properties of laminated veneer lumber [J]. BioResources, 2013, 8(2): 2681−2695.

[28] Donaldson L A. Wood cell wall ultrastructure The key to understanding wood properties and behaviour [J]. IAWA Journal, 2019, 40(4): 645−672.

[29] Jahan M S, Mun S P. Effect of tree age on the cellulose structure of Nalita wood (*Trema orientalis*) [J]. Wood Science and Technology, 2005, 39(5): 367−373.

[30] Lachowicz H, Wróblewska H, Wojtan R, et al. The effect of tree age on the chemical composition of the wood of silver birch (*Betula pendula* Roth.) in Poland [J]. Wood Science and Technology, 2019, 53(5): 1135−1155.

[31] Lachenbruch B, Johnson G R, Downes G M, et al. Relationships of density, microfibril angle, and sound velocity with stiffness and strength in mature wood of Douglas-fir [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2010, 40(1): 55−64.

[32] Cave I D, Walker J C F. Stiffness of wood in fast-grown plantation softwoods: the influence of microfibril angle [J]. Forest Products Journal, 1994, 44(5): 43.

（责任编辑　吴　娟
责任编委　曹金珍）